

522,162  
30.01.2005

Rec'd PCT/PTO

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

Rec'd PCT/PTO

24 JAN 2005

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
29. Januar 2004 (29.01.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
WO 2004/010222 A2

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: G03F 7/00

454025 (RU). WEGENER, Martin [DE/DE]; Weiher-  
strasse 1b, 76127 Karlsruhe (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2003/007819

(22) Internationales Anmeldedatum:  
18. Juli 2003 (18.07.2003)

(74) Gemeinsamer Vertreter: FORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE GMBH; Stabsabteilung Marketing,  
Patente und Lizenzen, Postfach 36 40, 76021 Karlsruhe  
(DE).

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(81) Bestimmungsstaaten (*national*): JP, US.

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
102 33 309.2 22. Juli 2002 (22.07.2002) DE

(84) Bestimmungsstaaten (*regional*): europäisches Patent (AT,  
BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR,  
HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR).

(71) Anmelder (*für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme  
von US*): FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE  
GMBH [DE/DE]; Weberstrasse 5, 76133 Karlsruhe (DE).

Veröffentlicht:  
— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu ver-  
öffentlichen nach Erhalt des Berichts

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (*nur für US*): MEISEL, Daniel  
[DE/DE]; Krähenweg 5, 76646 Bruchsal (DE). MIKLI-  
AEV, Iouri [RU/RU]; Argustovskaja 16, Tschelljabinsk

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Ab-  
kürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Co-  
des and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der  
PCT-Gazette verwiesen.

(54) Title: METHOD FOR THE PRODUCTION OF PHOTORESIST STRUCTURES

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON PHOTOLACKSTRUKTUREN

(57) Abstract: The invention relates to a method for producing a large variety of photoresist structures, according to which a volume of photosensitive material (5) is exposed at least once by means of at least two light beams (1, 2) which overlap within the volume of photosensitive material (5) and is then subjected to a development process, the light beams (1, 2) penetrating at least one transparent optical element (3). Said optical element (3) is embodied as a polyhedron which has planar or curved surfaces and largely prevents the light beams from refracting on the surface of the volume of photosensitive material (5) such that the angle of refraction of the light beams (1, 2) can be greater in the volume of photosensitive material (5) than the critical angle of the total reflection, which has a limiting effect without the optical element (3).

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer grossen Vielfalt an Photolackstrukturen. Hierbei wird ein Photolackvolumen (5) mit mindestens zwei Lichtstrahlen (1, 2), die einander innerhalb des Photolackvolumens (5) überlagern, mindestens einmal belichtet und danach einem Entwicklungsprozess unterworfen, wobei die Lichtstrahlen (1, 2) durch mindestens ein transparentes optisches Element (3) laufen. Das optische Element (3) ist ein Vielflächener mit ebenen oder gekrümmten Flächen, der die Brechung der Lichtstrahlen an der Oberfläche des Photolackvolumens (5) weitgehend vermeidet, so dass der Brechungswinkel der Lichtstrahlen (1, 2) im Photolackvolumen (5) grösser sein kann als der Grenzwinkel der Totalreflexion, der ohne das optische Element (3) begrenzend gilt.

WO 2004/010222 A2

## Verfahren zur Herstellung von Photolackstrukturen

Die Erfindung betrifft Verfahren zur Herstellung von Strukturen in einem Volumen aus Photolack (Photolackvolumen).

Um Photolackstrukturen herzustellen, wird entsprechend der in der WO 01/22133 A1 beschriebenen sogenannten holographischen Lithographie ein photoempfindliches Material mit einem Vielstrahl-Interferenzmuster, das aus der Überlagerung mehrerer Lichtstrahlen resultiert, belichtet und anschließend entwickelt. Die Form der so erzeugten Photolackstrukturen hängt im Allgemeinen von den Winkeln der interferierenden Lichtstrahlen im Inneren des Photolackes ab. Zum Ein- oder Auskoppeln der Lichtstrahlen wird dort die Verwendung eines transparenten optischen Elementes sowie nötigenfalls die Verwendung von Immersionssubstanz zwischen festen optischen Elementen vorgeschlagen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine größere Vielfalt an Photolackstrukturen herzustellen.

Gelöst wird diese Aufgabe durch die Merkmale des Patentanspruchs 1. Die Unteransprüche beschreiben vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung.

Bei der Einstrahlung von Lichtstrahlen in ein Photolackvolumen aus einem äußeren Medium (z. B. Luft) mit geringerer Brechzahl als Photolack ist der Bereich realisierbarer Ausbreitungsrichtungen der Lichtstrahlen im Inneren des Photolackvolumens in unerwünschter Weise eingeschränkt. Der Grund hierfür besteht darin, dass beim Übergang vom äußeren, optisch dünneren Medium in den Photolack die Brechung der Strahlen zu berücksichtigen ist, die sich durch Wahl der Einstrahlrichtung, wie in der WO 01/22133 A1 vorgeschlagen, nur begrenzt kompensieren lässt.

Der maximal erreichbare Brechungswinkel eines Strahles bei Einstrah-

lung aus dem äußeren Medium ist der Grenzwinkel der Totalreflexion, der bei Luft und typischen Photolacken einen Wert von ca.  $36^\circ$  annimmt. Dieser Wert würde streifenden Einfall erfordern. Winkel im Inneren des Photolacks, die größer als der Grenzwinkel der Totalreflexion sind, lassen sich durch Wahl der Einstrahlrichtung daher nicht einstellen.

Zunächst wird ein Photolackvolumen mit zwei, drei, vier, fünf, sechs oder mehr Lichtstrahlen belichtet, die sich innerhalb des Photolackvolumens so überlagern, dass darin ein Interferenzmuster erzeugt wird. Anschließend wird dieses Photolackvolumen einem Entwicklungsprozess unterworfen, wodurch eine dem Interferenzmuster entsprechende Photolackstruktur erzeugt wird.

Erfindungsgemäß werden die zwei, drei, vier, fünf, sechs oder mehr teilkohärenten Lichtstrahlen über einen Vielflächner in das Photolackvolumen hinein oder aus dem Photolackvolumen heraus geführt. Dadurch wird es möglich, Strahlwinkel im Inneren des Photolackes jenseits des Grenzwinkels der Totalreflexion zugänglich zu machen, d. h. Winkel zwischen den Strahlen im Inneren des Photolackes, die bei direkter Einstrahlung aus dem äußeren Medium nicht zugänglich sind. Bei Luft als äußeres Medium ist dieses der beträchtliche Wertebereich zwischen ca.  $36^\circ$  und  $90^\circ$ .

Darüber hinaus werden auch bei Brechungswinkeln unterhalb, insbesondere auch in der Nähe des Grenzwinkels der Totalreflexion, durch die Verwendung eines Vielflächners die Einkopplung und die Auskopplung der Lichtstrahlen wesentlich verbessert.

Erfindungsgemäß werden die optischen Elemente als Vielflächner, vorzugsweise als Teilprisma, bevorzugt als Pyramide, besonders bevorzugt als Pyramidenstumpf, oder in einer weiteren Ausgestaltung als Kugelabschnitt ausgestaltet.

Um den Übergang der Strahlen vom optischen Element in das Photolackvolumen zu ermöglichen, kann der Photolack direkt auf das optische Element aufgebracht werden. In einer anderen Ausgestaltung wird eine Immersionssubstanz zwischen das optische Element und das Photolackvolumen eingebracht. Wird der Photolack in flüssigem Zustand belichtet, kann die Immersionssubstanz gegebenenfalls entfallen.

Ein besonderer Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht darin, dass nicht nur einige ausgewählte, sondern alle Bravais-Gitter hergestellt werden können. Dies gilt insbesondere für die im Hinblick auf eine dreidimensionale vollständige Bandlücke interessante kubisch flächenzentrierte (fcc) Struktur (siehe K. Busch, S. John, PRE 1998, 58, S. 3896).

Der Brechzahlunterschied zwischen Luft und Photolack (1 bzw. 1,6 bei Photolack SU-8) reicht vermutlich jedoch nicht aus, um eine vollständige dreidimensionale Bandlücke im Photonischen Kristall zu erzielen. Durch Auffüllen (Infiltration) der Poren der Photolackstruktur (Templat, verlorene Form) mit einem transparenten und stark brechenden Material und nachfolgendem Entfernen des Photolackes kann die komplementäre Struktur aus hochbrechendem Material hergestellt werden. Hierzu ist erforderlich, dass sowohl die Poren als auch das Photolack-Gerippe jeweils zusammenhängend sind. Die Poren müssen miteinander verbunden sein, damit zum einen der unpolymerisierte Photolack herausgelöst werden kann und zum anderen die Poren anschließend durchgängig mit hochbrechendem Material befüllt (infiltriert) werden können. Die Photolackstruktur muss zusammenhängend sein, damit sie mechanisch stabil ist und nicht auseinander fällt.

Es wird darauf hingewiesen, dass in der WO 01/22133 A1 zwar versucht wurde, fcc-Strukturen mit dem so genannten Vielstrahl-Interferenz-Verfahren mittels Einstrahlung von Lichtstrahlen direkt aus Luft herzustellen. Im Innern des Photolacks entstand aufgrund der Brechung an der Luft-Photolack-Grenzfläche tatsächlich jedoch keine fcc-Struktur, sondern vielmehr eine andere Struktur, die nach gegenwärtigem Kennt-

nisstand für Anwendungen als Templat für Photonische Kristalle mit vollständiger dreidimensionaler Bandlücke nicht geeignet ist.

Erfindungsgemäße Photolackstrukturen eignen sich darüber hinaus als Effektbeschichtung von Oberflächen, als Partikelfilter, als Mikromischer, als Volumengitter, als Beugungsstruktur oder dispersive Struktur, als Photonischer Kristall oder als verlorene Form für einen Photonischen Kristall.

Im Folgenden wird die Erfindung mit Hilfe der Figuren beschrieben. Es zeigt

**Fig. 1** die Realisierung von Strahlwinkeln in einem Photolack über den Grenzwinkel der Totalreflexion hinaus und

**Fig. 2** einen schematischen Schichtaufbau für das Verfahren.

Durch die Brechung an der Luft-Photolack-Grenzfläche wird ein Lichtstrahl mit dem Einfallswinkel  $\alpha$  10 zur Oberflächennormale (Lot) des Photolackes 9 in den Photolack 9 gemäß dem Snelliusschen Brechungsgesetz

$$\sin(\alpha) = n_{\text{Photolack}} \times \sin(\gamma)$$

gebrochen, wobei  $\gamma$  11 den Winkel des gebrochenen Lichtstrahles bezüglich der Oberflächennormalen im Innern des Photolacks bezeichnet. Für den verwendeten Photolack betrug bei der Belichtung  $n \approx 1,67$ .

Bei einer Vierstrahl-Konfiguration in so genannter regenschirmartiger Anordnung (umbrella-like configuration) (siehe K. I. Petsas et al., Phys. Rev. A 1994, 50, Seite 5173) liegen, wie in **Fig. 1** dargestellt, drei der Strahlen - im Folgenden Nebenstrahlen genannt - bzw. deren Wellenvektoren gleichmäßig verteilt auf einem Kegelmantel, wobei alle drei Wellenvektoren zur Spitze des Kegels hin zeigen. Ein weiterer Strahl - im Folgenden Referenzstrahl genannt - liegt auf der Achse

des Kegels und weist ebenso zur Spitze des Kegels hin. Der Referenzstrahl bildet das Einfallslot zur Photolackschicht. Um mit dieser Strahlenkonfiguration z. B. eine Struktur mit fcc-Translationssymmetrie herzustellen, muss der Winkel zwischen den Nebenstrahlen und dem Referenzstrahl im Inneren des Photolackes  $\gamma_{fcc}$

$$= \arccos(7/9) \approx 38,94^\circ$$
 betragen.

Dessen Realisierung steht zunächst die Totalreflexion entgegen, denn der Grenzwinkel der Totalreflexion  $\gamma_{Grenz}$  11 für den Photolack SU-8 beträgt  $\gamma_{Grenz} = \arcsin(1/n_{Photolack}) \approx 36,78^\circ < \gamma_{fcc}$ . Diese Tatsache hindert daran, den inneren Winkel  $\gamma_{fcc}$  12 und überhaupt alle Winkel  $\gamma > \gamma_{Grenz}$  zwischen dem Referenzstrahl und den Nebenstrahlen im Inneren des Photolackes bei direkter Einstrahlung aus Luft zu realisieren. Daher sind Strukturen mit fcc-Translationssymmetrie und beispielsweise auch mit einfach kubischer (sc) Translationssymmetrie ( $\gamma_{sc} = \arccos((\sqrt{3})/6) \approx 73,22^\circ$ ) in dieser Konfiguration durch Belichtung direkt aus Luft nicht herstellbar.

Für das Ausführungsbeispiel wurden kommerziell erhältliche Negativ-Photolacke verwendet, z.B. der Photolack SU-8. Diese wurden auf Glassubstrate (Durchmesser 25 mm, Dicke 5-7 mm) mit einer Lackschleuder aufgebracht (Spincoating). Damit erreichte man Schichtdicken von ca. 10 bis 50  $\mu\text{m}$ . Um das Lösungsmittel weitgehend zu entfernen, wurde die Probe anschließend für ca. 1 Stunde auf  $65^\circ\text{C}$  erwärmt (soft bake).

Die nachfolgende Belichtung im Mehrstrahl-Interferenz-Aufbau erfolgte in der regenschirmartigen Anordnung (umbrella-like configuration). Die vier zueinander kohärenten Strahlen wurden durch Aufteilung des Strahles eines Lasers mittels Strahlteilern erhalten. Geeignet hierfür ist beispielsweise ein gütegeschalteter, frequenzverdreifachter (355 nm Wellenlänge), durch seeding longitudinal einmodiger Nd:YAG-Pulslaser. Durch die Impulsdauer von ca. 6 ns wurde Verwackelungsunschärfe vermieden. Vorteilhaft ist es, wenn sich die Intensität und

die Polarisierung jedes Teilstrahles getrennt voneinander einstellen lassen. Dies bedeutet insbesondere, dass die Strahlen unabhängig voneinander elliptisch, zirkular oder linear polarisiert eingerichtet werden können. Eine besondere Ausgestaltung besteht darin, dass der Referenzstrahl zirkular und die drei Nebenstrahlen linear, und zwar in ihrer jeweiligen Einfallsebene (sog. p-Polarisierung) polarisiert sind. Das Verhältnis der Strahlenergien betrug 1,5:1:1:1 für Referenzstrahl : Nebenstrahl Nr. 1 : Nebenstrahl Nr. 2 : Nebenstrahl Nr. 3.

Mit diesen Strahlen wurde der Photolack mit einem einzelnen Laser-Impuls belichtet. Die für diese Belichtung notwendige Impulsenergie betrug vor der Aufteilung in vier Teilstrahlen ca. 8 mJ. Bei einer Strahl-Querschnittsfläche von ca.  $1/2 \text{ cm}^2$  betrug die über den Querschnitt des Laserstrahls gemittelte Energie pro Fläche ca.  $16 \text{ mJ/cm}^2$ . Dies führte zu einem Füllfaktor der Strukturen von ca. 50%.

Um eine Struktur mit fcc-Translationssymmetrie im Photolack zu generieren, muss der halbe Öffnungswinkel  $\gamma$  des Kegels im Innern des Photolackes die Bedingung  $\gamma = \arccos(7/9) \approx 38,94^\circ$  erfüllen. Dieser Winkel wird erfindungsgemäß durch Vorschalten eines speziell ausgeführten Vielflächners erreicht: Hierfür wurde ein modifizierter Retroreflektor, bei dem die Spitze abgetrennt und die Schnittfläche poliert wurde, verwendet (Pyramidenstumpf). Die Strahlführung ist in **Fig. 2** dargestellt.

Die Lichtstrahlen 1, 2 werden vom optischen Element 3, das als Einkoppel-Prisma ausgestaltet ist, über eine Immersionssubstanz 4 aus destilliertem Wasser in das Photolackvolumen 5 geleitet, das in diesem Ausführungsbeispiel auf einem Glassubstrat 6 aufgebracht ist. Um Rückreflexe von der Unterseite des Substrates 6 zu unterdrücken, schließt ein schwarz eloxiertes Aluminiumblech als Absorber 8 den Strahlengang ab.

Zwischen Substrat 6 und Absorber 8 befindet sich eine weitere Immersionssubstanz 7 aus Öl. Ohne diese Auskoppel-Maßnahmen würden an der

Unterseite des Substrats der Referenzstrahl 1 teilweise und die anderen drei Strahlen 2 total reflektiert und sich der Interferenz störend überlagern.

Der mit dem Interferenzmuster belichtete Photolack wurde zur Polymerisation für ca. 6 Minuten erwärmt, wobei die Temperatur von ca. 65° C auf ca. 92° C anstieg (post exposure bake). Nach dem Herausnehmen aus dem Ofen und Abkühlung ließ man die Probe für mindestens 30 Minuten ruhen.

Die Proben wurden zur Entwicklung für ca. 30 Minuten bis ca. 1 Stunde in einem Bad mit SU-8-Entwickler, der 1-Methoxy-2-propylacetat enthielt, ruhend stehen gelassen. Durch den Entwicklungsprozess wurden die schwach belichteten Bereiche des Photolacks im Entwickler aufgelöst; die stärker belichteten hingegen blieben stehen (SU-8 ist ein sog. „negativer“ Photolack). Ein ca. zehnminütiges Bad in 2-Propanol schloss den Entwicklungsprozess ab.

Die Proben zeigen Risse, die wegen der ungleichmäßigen Volumenänderung (Quellung bzw. Schrumpfung) während des Entwicklungsprozesses auftreten. Manchmal löst sich die Probe ganz oder teilweise vom Substrat; Template stehen dann auch substratfrei zur Verfügung. Die Fläche der resultierenden Bruchstücke beträgt ca. 1 mm<sup>2</sup>. Form und Größe der Bruchstücke kann durch gezieltes Einbringen von Ritzen in den Photolack (als Soll-Bruchstellen) kontrolliert werden.

Durch Verwendung eines positiven an Stelle eines negativen Photolackes erhält man die jeweils invertierte Struktur, die sich bei Verwendung eines negativen Lackes ergeben würde.

Ein gezieltes zerstörungsfreies Ablösen des Templots vom Substrat erreicht man durch Einbringen in ein Bad mit erwärmter oder kochender Salzsäure.



Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung ist die Belichtung des Photolacks durch das Glassubstrat hindurch. Hierzu wird das Substrat 6 einschließlich des hierauf mittels Spincoating aufgetragenen Photolackvolumens 5 umgedreht. Die Einstrahlung erfolgt von der sehr ebenen Seite des Photolacks, der auf dem Substrat 6 perfekt aufliegt, anstatt von der freien, im Allgemeinen weniger perfekten abgewandten Oberfläche der Photolackschicht.

Alle Teilstrahlen erfahren beim Eintritt aus dem äußeren Medium (z. B. Luft) in das Prisma mehr oder weniger starke Reflexionsverluste, die dadurch vermieden werden, dass alle Eintrittsflächen mit für den Einfallswinkel und die jeweilige Polarisierung geeigneten Antireflexschichten versehen werden.

Für einen gegebenen inneren Winkel im Photolack und den hiervon (wegen der im Allgemeinen anderen Brechzahl) abweichenden Winkel im Prisma werden in einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung die schräg stehenden Eintrittsflächen so orientiert hergestellt, dass die Strahlen gerade bei senkrechtem Eintritt in die Seitenflächen des Prismas den gewünschten Winkel im Photolack ergeben. Auf diese Weise lässt sich die korrekte Einstrahlrichtung besonders leicht und genau kontrollieren, weil der (auch bei Antireflex-Beschichtung vorhandene) restliche Rückreflex als Indikator genutzt werden kann: Die Reflexion eines Strahles in sich (Retroreflexion) ist besonders einfach verifizierbar. Außerdem ergibt sich eine Antireflex-Beschichtung unabhängig von der Strahlpolarisation.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung werden die Immersions-substanz und das Material, aus dem das Prisma besteht, so gewählt, dass sie die gleiche Brechzahl wie der Photolack haben. Dadurch werden auch geringe Rückreflexe vermieden und die Einkoppleffizienz erhöht.

In einer weiteren Ausgestaltung werden die seitlichen Eintrittsflächen gerade so orientiert, dass sie bei korrekter Justierung

bezüglich der eintretenden Strahlen unter dem Brewster-Winkel stehen. Hierdurch lässt sich die korrekte Einstellung des Winkels sehr präzise als Verschwinden der Reflexion des p-Anteils des Strahles erkennen.

In einer weiteren Ausgestaltung werden alle vier Strahlen parallel zueinander eingerichtet, wobei sie jedoch gegeneinander seitlich versetzt sind. Die Eintrittsflächen des Prismas werden so orientiert, dass sich die erforderlichen Winkel durch Brechung beim Eintritt in das Prisma ergeben. Die erforderliche Parallelität der Strahlen lässt sich mit hoher Genauigkeit beispielsweise durch Strahlteiler aus planparallelen Platten geeigneter Dicke verwirklichen. Die Aufgabe zur präzisen Winkeleinstellung zwischen den vier Strahlen wird auf diese Weise fast vollständig auf die sehr gut beherrschte Herstellung berechneter Winkel bei der Prismenfertigung übertragen.

Anstelle eines Absorbers 8 wird in einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung ein weiteres Prisma, das identisch mit dem für die Einkopplung verwendeten Prisma sein kann, zum Auskoppeln derjenigen Lichtstrahlen, die den Photolack und das Substrat bereits durchlaufen haben, verwendet. Die ausgekoppelten Strahlen stehen dann für weitere Analysen zur Verfügung, etwa für die Kontrolle der Polarisationszustände der Strahlen.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung der Strahlkonfiguration besteht darin, den Laserstrahl in vier Teilstrahlen aufzuteilen, wobei die Wellenvektoren von zwei Strahlen in einer Ebene liegen und die Wellenvektoren der beiden anderen Strahlen in einer weiteren Ebene, die senkrecht zur ersten Ebene steht. Das Wellenpaar, deren Wellenvektoren in der ersten Ebene liegen, propagiert dabei gegenläufig zu dem Wellenpaar in der anderen Ebene (K. I. Petsas et al., PRA 1994, 50, Seite 5173). Die Winkelhalbierende zwischen zwei Teilstrahlen ist beiden Paaren gemeinsam und bildet gleichzeitig das Lot zur Photolackschicht.

Das folgende Beispiel von vier Richtungsvektoren für die Wellenpropagation ergibt in der obigen Konfiguration eine fcc-Struktur:

$$[2, 0, 1], \quad [-2, 0, 1], \quad [0, 2, -1], \quad [0, -2, -1].$$

Die Photolackschicht wird von zwei Seiten, d.h. aus zwei Halbräumen, die durch die Photolackschicht voneinander getrennt sind, belichtet. Der innere Winkel der Strahlen zum Lot der Photolackschicht beträgt dann jeweils  $\gamma_{fcc} = 0,5 * \arccos(-3/5) \approx 63,43^\circ$ . Dieser Winkel im Inneren des Photolackes ist bei direkter Einstrahlung aus Luft nicht zu erreichen.

Daraus ergibt sich, dass die Strahlen von einem Halbraum in den Photolack eingekoppelt werden müssen und die Strahlen aus dem anderen Halbraum kommend ausgekoppelt werden müssen. Dies wird dadurch erreicht, dass die Photolackschicht zwischen zwei Dachprismen liegt, wobei die Dachflächen nach außen zeigen und die Prismen um  $90^\circ$  gegen einander verdreht sind. Jedes dieser Dachprismen dient für das eine Strahlenpaar als Einkopplungselement und für das andere als Auskopplungselement. Dies geschieht durch Abschrägen (Modifizieren) der senkrechten Seitenflächen der Prismen zu Pyramiden. Durch jedes dieser modifizierten Dachprismen tritt das eine Strahlenpaar ein und das andere Strahlenpaar aus. Um das Licht ein- und wieder auszukoppeln braucht man zwischen dem modifizierten Dachprisma und der Photolack-Schicht bzw. dem Substrat je eine Schicht aus einer geeigneten Immersionssubstanz 4, 7.

In einer weiteren Ausgestaltung werden während der Belichtung Bereiche des Photolacks gezielt abgedeckt (Maskierung), so dass nur Teile des Interferenzmusters im Photolack konserviert werden. Dadurch erhält man beispielsweise Template wählbarer Randform. Dieses Vorgehen ist sowohl bei positiven als auch bei negativen Photolacken von Interesse, weil die unbelichteten - d. h. die durch die Maskierung abgedeckten - Teile entweder stehen bleiben bzw. aufgelöst werden.

Durch eine strukturierte Vor- oder Nachbelichtung des Photolacks etwa mittels konventioneller Maskentechnik kann der Photolack in einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung in bestimmten Bereichen überbelichtet werden. Danach wird die oben beschriebene Vielstrahl-Interferenztechnik auch auf die noch unbelichteten Partien angewendet. Bei einem negativen Photolack bilden die überbelichteten Bereiche Vollmaterial.

So entsteht ein Photolacktemplat, das von Vollmaterial umgeben ist. Dies ermöglicht eine bessere Handhabung des resultierenden Photolacktemplates, insbesondere dann, wenn die gesamte Photolackschicht vom Substrat abgelöst wird. Durch Wechsel zu positivem Photolack sind jeweils komplementäre Strukturen realisierbar.

Auf eine Schicht negativen Photolacks z. B. aus SU-8, die durch eine UV-Lampe vollständig überbelichtet und danach wahlweise entwickelt wurde (passivierte Haftschrift), kann man in einer weiteren Ausgestaltung eine weitere Photolack-Schicht zum Beispiel ebenfalls aus SU-8 aufbringen, die dann mit einem Interferenzmuster belichtet wird. Nach der Entwicklung dieser Schicht, die auf der Haftschrift liegt, erhält man ein Templat, das nach Ablösung vom Substrat auf einer Vollmaterial-Schicht aus Photolack (Haftschrift) liegt. Diese Haftschrift bildet dann ein Substrat von geringer Dicke, das die gleiche chemische Zusammensetzung aufweist wie die Photolack-Struktur.

Wegen der Absorption des Lichtes bei Propagation durch den Photolack ergibt sich eine Abnahme der Lichtintensität längs der Propagationsrichtung und damit in einer weiteren Ausgestaltung die Möglichkeit einer Variation des Füllfaktors mit der Tiefe (Verlaufs-Struktur). Durch geeignete Zusätze zum Photolack und/oder durch das Auftragen mehrerer Schichten verschiedener Lacke, deren Lichtempfindlichkeiten sich voneinander unterscheiden, kann die Absorption und damit die Stärke der Variation mit der Tiefe beeinflusst werden.

Umgekehrt führt eine Vermeidung der Absorption etwa durch Reinigung mit Entfernung absorbierender Beimischungen zu einer homogenen

## Struktur der Photolackstruktur.

Die Strahlen fallen schräg in den Photolack ein. Dadurch ist der effektive Strahlquerschnitt anders als derjenige des ursprünglichen zum Beispiel runden Strahls. Eine bessere Überlappung aller Strahlen erreicht man dadurch, dass man diese mit bekannten optischen Elementen wie etwa mit anamorphischen Prismenpaaren in ihrem Querschnitt derart vor-verformt, dass sie durch den schrägen Einfall effektiv kreisförmig werden.

Bei Ausbreitung des Referenzstrahles in die entgegen gesetzte Richtung im Vergleich zur umbrella-like-Konfiguration erhält man andere Strukturen, insbesondere Spiralstrukturen.

Eine spezielle Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht darin, nur drei Strahlen zu verwenden. Dadurch lassen sich zweidimensional periodische Photolack-Strukturen erzeugen. Mit Hilfe eines erfindungsgemäßen Einkoppelprismas lassen sich größere Winkel zwischen den Strahlen im Photolackvolumen realisieren und damit kleinere Gitterkonstanten als bei direkter Einstrahlung aus Luft.

**Patentansprüche:**

1. Verfahren zur Herstellung von Photolackstrukturen, bei dem ein Photolackvolumen (5) mit mindestens zwei Lichtstrahlen (1, 2), die einander innerhalb des Photolackvolumens (5) überlagern, mindestens einmal belichtet wird und danach einem Entwicklungsprozess unterworfen wird, wobei die Lichtstrahlen (1, 2) durch mindestens ein transparentes optisches Element (3) laufen, dadurch gekennzeichnet, dass das optische Element (3) ein Vielflächener mit ebenen oder gekrümmten Flächen ist.
2. Verfahren zur Herstellung von Photolackstrukturen nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als Vielflächener ein Teilprisma mit ebenen Flächen verwendet wird.
3. Verfahren zur Herstellung von Photolackstrukturen nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass als Teilprisma eine Pyramide verwendet wird.
4. Verfahren zur Herstellung von Photolackstrukturen nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass als Teilprisma ein Pyramidenstumpf verwendet wird.
5. Verfahren zur Herstellung von Photolackstrukturen nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als Vielflächener ein Kugelabschnitt verwendet wird.
6. Verfahren zur Herstellung von Photolackstrukturen nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass das Photolackvolumen (5) direkt auf einem der optischen Elemente (3) aufgebracht ist.
7. Verfahren zur Herstellung von Photolackstrukturen nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass zwei optische Elemente eingesetzt werden, zwischen denen sich das Photolackvolu-

men (5) befindet.

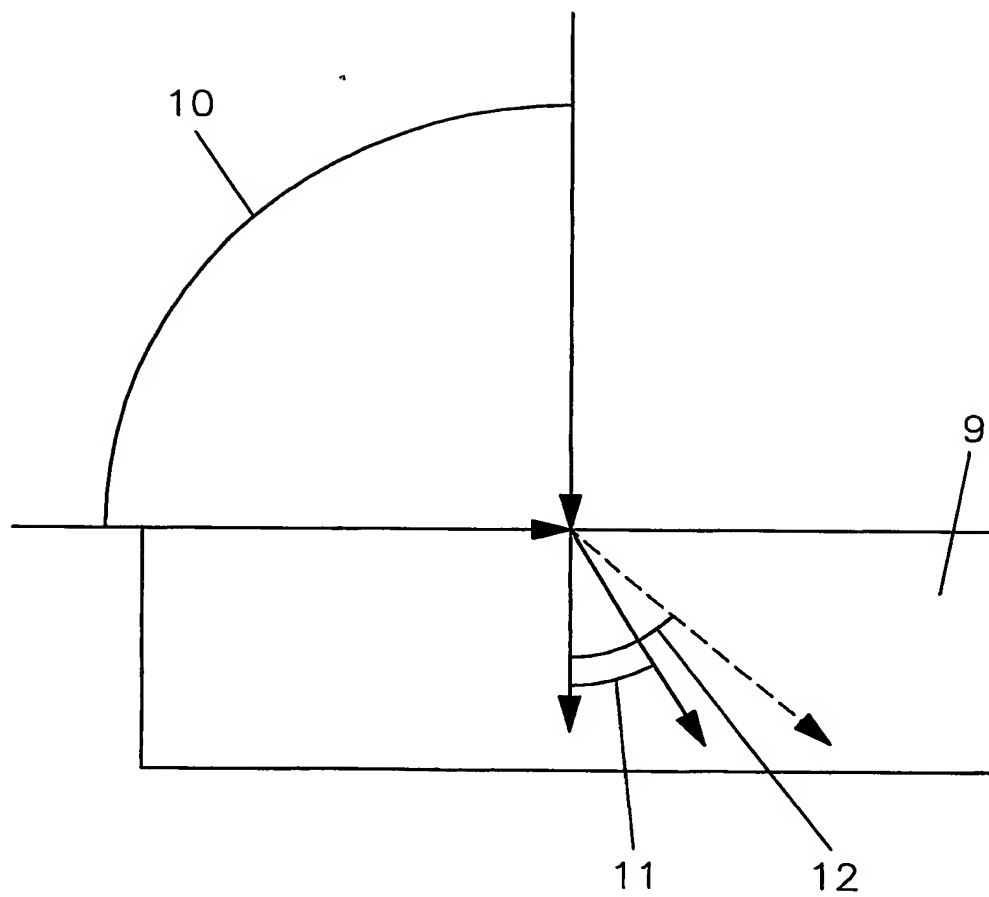
8. Verfahren zur Herstellung von Photolackstrukturen nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass sich zwischen mindestens einem der optischen Elemente (3) und dem Photolackvolumen (5) eine Immersionssubstanz (4) befindet.
9. Verfahren zur Herstellung von Photolackstrukturen nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Lichtstrahlen (1, 2) hinsichtlich ihrer Intensität, Phase und Polarisation unabhängig voneinander eingerichtet sind.
10. Verfahren zur Herstellung von Photolackstrukturen nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens zwei Belichtungen des Photolackvolumens (5) vorgesehen sind, zwischen denen die Lichtstrahlen (1, 2) und das Photolackvolumen (5) relativ zueinander bewegt werden.
11. Verfahren zur Herstellung von Photolackstrukturen nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass einzelne Bereiche auf der Oberfläche des Photolackvolumens (5) mit mindestens einer Schattenmaske abgedeckt sind.
12. Verfahren zur Herstellung von Photolackstrukturen nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass das Photolackvolumen (5) zusätzlich mit einem einzelnen Strahl belichtet wird.
13. Verfahren zur Herstellung von Photolackstrukturen nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass das Photolackvolumen (5) in Segmente zerlegt ist.
14. Verfahren zur Herstellung von Photolackstrukturen nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass das Photolackvolumen auf ein weiteres mit mindestens einem Strahl belichtetes Photolackvolumen aufgebracht ist.

15. Photolackstruktur, hergestellt nach einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14.



1/2

Fig. 1



2/2

Fig. 2

